Ninth LACCEI Latin American and Caribbean Conference (LACCEI'2011), Engineering for a Smart Planet, Innovation, Information Technology and Computational Tools for Sustainable Development, August 3-5, 2011, Medellín, Colombia.

ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE FLUJOS DE ALUMINIO EN MOLDES PERMANENTES AL TAMAÑO DE MALLA Y COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA TERMICA

Sandra Carolina Murcia S.

smurcias@eafit.edu.co

E. Alexander Ossa Henao

eossa@eafit.edu.do

Marco A. Paniagua

mpaniag@eafit.edu.co

Grupo de investigación en Materiales de Ingeniería, Universidad Eafit, Medellín, Colombia.

RESUMEN

Los procesos de fundición son utilizados ampliamente en la producción de componentes metálicos por la facilidad que tienen de obtener grandes volúmenes de piezas con geometrías complicadas y bajos costos de producción. Es por esto que industrialmente se ha venido adoptando el uso de software que permitan la simulación del proceso de llenado y solidificación de las piezas, y al ser muchas veces este proceso a nivel de taller, se han utilizado códigos "amables con el usuario" que permiten un "pilotaje" de la simulación, mas no su evaluación usando criterios como la convergencia de los resultados. En el presente estudio se realizó la simulación del llenado en la producción de probetas de tensión mediante fundición en molde permanente con el programa SolidCast®, mostrando los problemas de dependencia de malla que se tienen al utilizar tres parámetros de proceso diferentes y evaluando la sensibilidad que presenta el código al coeficiente de transferencia térmica (HTC), ingresado durante el pre-procesamiento. Se encontró que a medida que se incrementa la temperatura de trabajo, incrementa tanto la dependencia del resultado a la malla utilizada como la sensibilidad al HTC elegido. En este trabajo se definen los parámetros adecuados de procesamiento (temperaturas) y modelación (HTC y tamaños de malla) para realizar llenados adecuados de moldes permanentes con aluminio para la fabricación de micro-probetas para ensayos de tensión.

Palabras claves: fundición en molde permanente, aluminio, dependencia de malla, Coeficiente de transferencia Térmica, Dinámica computacional de fluidos.

ABSTRACT

Casting processes are widely used in the production of metal components thanks to the ease of obtaining large volumes of parts with complex geometries and low production costs. That is why industry has been adopting the use of software that allows the simulation of filling and solidification processes of the parts. This process is often carried out at the foundry, which explains why these software's are considered "user friendly", allowing a "drive thru" the simulation without using a strong criteria for evaluation such as the convergence of the results. This study presents the simulation and analysis of the filling of a permanent mold to produce aluminum tensile

specimens using the commercial software SolidCast ®. Simulations showed mesh size related problems that occur with the use of three different processing temperatures. The software also showed great variability when the heat transfer coefficient (HTC) was varied using values found experimentally, from literature and theoretically calculated. It was found that while the temperature increases, there is a rise in the dependence of results to the mesh and the sensitivity to HTC chosen. This work defines the appropriate processing (temperature) and modeling (HTC and mesh size) parameters required to successfully fill permanent moulds with aluminum for the fabrication of tensile testing micro-specimens.

Keywords: Permanent die Casting, aluminum, mesh dependence, Heat transfer coefficient, Computational Fluids Dynamic.

1. INTRODUCCIÓN

En varios sectores industriales como el automotriz y el aeroespacial, la demanda de piezas fundidas de alta precisión obliga a tener un mejor conocimiento de los fenómenos físicos que ocurren en las diferentes etapas del proceso (Ik-Tae et al, 2001), para esto la simulación numérica provee un medio eficaz de análisis, ofreciendo una visión detallada del flujo del fluido dentro de la cavidad del molde, la transferencia de calor y la solidificación (Campbell, 1991;. Flemings, 1974; Ik-Tae, 2001; Kermanpur, 2008).

Debido a la naturaleza de las ecuaciones que describen el problema, no es posible obtener una solución analítica, razón por la cual la simulación numérica provee un medio eficaz de análisis permitiendo observar y cuantificar aquellas características que no son visibles o medibles fácilmente durante los procesos de fundición, con el fin de acortar los procesos de diseño y su optimización, conduciendo a materiales de mejor calidad (Ik-Tae, 2001; Kermanpur, 2008; Sirviö, 2009).

Desde un punto de vista macroscópico, los procesos de fundición enlazan el proceso de solidificación y transferencia de calor con el flujo del fluido. En cuanto al flujo existen tres mecanismos que pueden ser identificados: a) el llenado del molde a través del sistema de compuertas (ataques de colada), b) el flujo residual debido al momentum de entrada y c) el flujo natural regido por convección dentro del molde (Flemings, 1974)..

Para conocer si el diseño del molde realizado es el correcto, existen diferentes paquetes comerciales con los cuales se puede simular el comportamiento del proceso de llenado y solidificación de metales. A nivel industrial existen programas de fácil interacción con el usuario que permiten “pilotear” la simulación, es decir, llevarla a cabo sin tener mayor conocimiento sobre los códigos y la física misma de los procesos que se están evaluando. Esto genera que los resultados obtenidos sean tomados como precisos y acordes con el fenómeno que se simula, ya que no se tiene un criterio para evaluar por ejemplo la convergencia de los cálculos que se ejecutan dentro del código con el que opera el software.

Teniendo en cuenta lo anterior es importante realizar una validación de los datos ingresados al software de simulación para poder obtener resultados que reflejen con la mayor precisión los resultados obtenidos en planta (Schmith). Adicionalmente existen ciertas variables que al estar involucradas en el modelo matemático juegan un papel importante en las predicciones de llenado y tiempo de solidificación, como lo es el coeficiente de transferencia térmica (Jolly, 2002; Chellaih, 2007; Haipeng, 2010).

En este artículo, el código comercial SolidCast® se utilizó para la simulación del flujo de aluminio puro dentro de la cavidad de un molde permanente, observando las alteraciones que se producen en los resultados de la simulación al evaluar la dependencia con el tamaño de malla utilizada (Shang, 2010; Tóth, 2010) y la sensibilidad de los códigos al coeficiente de transferencia térmica (HTC), ingresado durante la fase de pre-procesamiento.

2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

SolidCast® está basado en el método de diferencias finitas (FDM) para solucionar las ecuaciones de Navier-Stokes. El proceso (Figura 1) inicia en el módulo FlowCast® que evalúa simultáneamente los cambios

volumétricos que suceden durante el llenado, con el fin de entregar esta información al módulo de solidificación para poder identificar los defectos que se generen en las piezas.



Figura 1. Esquema del proceso de simulación en SolidCast ®

Información adicional sobre el código del software SolidCast®, es decir ecuaciones utilizadas, métodos de seguimiento de superficies libres, elaboración de malla, ecuaciones para medios porosos, convergencia, etc. son desconocidas para el usuario, por lo cual facilita el "pilotaje" del programa, pero imposibilita un análisis profundo de los resultados que se obtienen.

Aún así se conoce que las fundiciones en su estado líquido son tomadas como fluidos newtonianos incompresibles con flujo laminar (Ik-Tae et al, 2001), por lo cual las ecuaciones de conservación de masa, momentum y energía que normalmente se utilizan son las siguientes:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla . [\rho \boldsymbol{u}] = 0 \qquad (1)$$

$$\frac{\partial [\rho \boldsymbol{u}]}{\partial t} + \nabla \cdot [\rho \boldsymbol{u}\boldsymbol{u}] = \nabla \cdot [\mu \nabla \boldsymbol{u}] + S \qquad (2)$$

$$\frac{\partial [\rho \boldsymbol{H}]}{\partial t} + \nabla \cdot [\rho \boldsymbol{u}\boldsymbol{H}] = \nabla \cdot [k \nabla T] \qquad (3)$$

Donde ρ es la densidad, t es el tiempo de llenado del molde, μ es la viscosidad del material en estado fundido, *k* la conductividad térmica, *H* la entalpia total, *T* la temperatura, **g** es la aceleración de la gravedad y ***u*** es el vector de velocidad. El término fuente S en la ecuación de momento tiene en cuenta la convección natural y se expresa así:

$$S = -\frac{C(1-f_1)}{f_1^3}\boldsymbol{u} + \rho \boldsymbol{g} \beta (T - T_{ref}) \qquad (4)$$

Donde C es la constante que relaciona la morfología de la fase en solidificación, f_l la fracción líquida y β es el coeficiente de expansión volumétrica.

Un análisis de flujo laminar es suficiente para resolver el problema investigado ya, que el flujo dentro del molde se convierte rápidamente de un estado turbulento inicial a un flujo laminar debido a la solidificación, que tendrá a la vez una dependencia adicional a la geometría del molde y los conductos de acceso al mismo (Ik-Tae et al, 2001).

El coeficiente de transferencia térmica o HTC es un valor que analíticamente es difícil de calcular ya que depende de la geometría, la naturaleza del fluido estudiado y sus propiedades de transporte.

Este coeficiente aparece en la ley de enfriamiento de Newton:

$$q = h(T_s - T_\infty) \qquad (5)$$

Donde h es el HTC, q es el flujo de calor (W/m^2) y es proporcional a la diferencia de temperaturas entre la superficie y el fluido. Las diferentes ecuaciones que puede tomar el cálculo de q por la diferencia de fenómenos de transferencia de calor (conducción, radiación y convección) se encuentran en Doe fundamentals handbook thermodynamics, heat transfer,and fluid flow Volume 2 of 3 (U.S. Department of Energy, 1992).

Haipeng et al determinaron que en cuanto al HTC, la interacción que posee una mayor influencia en los resultados es aquel que se obtiene entre la fundición y el molde. Este coeficiente es conocido como el coeficiente de transferencia térmica interfacial o IHTC, el cual no es una propiedad del material, pero es un parámetro que muestra una fuerte dependencia de las condiciones químicas, físicas e interfaciales dentro del molde de fundición, propiedades del molde y el material a fundir, técnicas de procesamiento, geometría y tamaño de la fundición.

Teniendo en cuenta lo anterior, se hace evidente que el IHTC es uno de los parámetros mas complejos en cuanto a la modelación de piezas fundidas si se tiene en cuenta además que entre el metal fundido y la pared del molde, existe un espacio libre que tiene la tendencia a cambiar con el tiempo gracias a la diferencia entre la expansión térmica del metal fundido y el molde .

Un método que sirve para la aproximación del IHTC es el método "interface air-boner gap", el cual está descrito por:

$$IHTC = \frac{\sigma(T_2^2 + T_1^2)(T_2 + T_1)}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} + 1} \quad (6)$$

Donde σ es la constante de Stefan-Boltzman; T_1 es la temperatura de la superfcie de la aleación; T_2 es la temperatura de la superficie interna del molde; ε_1 es la emisividad de la aleación; ε_2 es la emisividad del molde. Aun así, las emisividades son dificiles de calcular por lo cual se debe acudir a interaciones hasta ajustar el modelo a la realidad (Haipeng et al, 2010).

3. SIMULACIÓN NUMÉRICA

Se simuló el llenado de la cavidad del molde permanente fabricado en acero AISI-SAE 1020 maquinado bajo la norma ASTM B 108/B 108M – 08, la cual indica los procedimientos que se deben seguir para fabricar fundiciones de aluminio en molde permanente. La geometría de la cavidad sugerida por la norma fue escalada de forma tal que la probeta para el ensayo de tensión tuviera una proporción 1:2.5 de la probeta original, aunque algunas medidas se conservaron para facilitar la alimentación del material, como por ejemplo el espesor de la compuerta que une el canal de alimentación y el bebedero.

La modelación geométrica se realizó mediante el software Pro-engineer® y con éste se efectuó el mecanizado de la cavidad (Figura. 2). Posteriormente, las probetas y canales de alimentación fueron creados en un formato STL binario e importado al SolidCast®, en el cual se debe especificar cada parte que prioridad tiene y que representa dentro del molde.

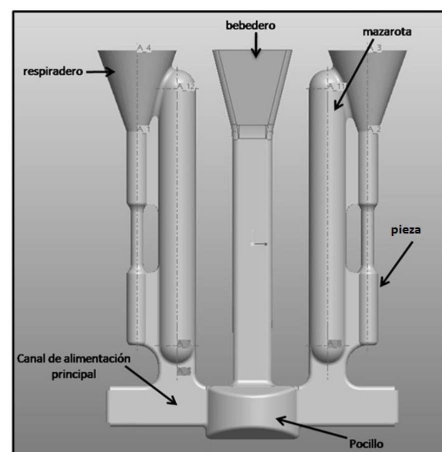


Figura 2. Modelo sólido de la cavidad de llenado

Las propiedades termo-físicas del aluminio y del molde se tomaron directamente de la base de datos del software y se encuentran detalladas en la Tabla 1.

A medida que el metal se solidifica, poco a poco se transforma de un material totalmente líquido a un material totalmente sólido. A medida que el metal se vuelve más y más sólido, llega un punto en el que el metal líquido ya no puede fluir (Kumruoglu and Özer, 2008) . Este punto se llama la fracción solida crítica o CSF. Por lo general se expresa como un porcentaje de la solidificación completa y en este caso es tomado como 30% por sugerencia encontrada en los manuales del programa para trabajar con aluminio.

Inicialmente para realizar el llenado del molde se trabajó una temperatura de vaciado del aluminio de 720°C dentro del molde a temperatura ambiente (25°C). Bajo estas condiciones se presentaba un flujo del material hasta 1/3 del pocillo (Figura 2), lo cual era insatisfactorio. Para solucionar este problema se propusieron dos posibilidades (Tabla 2); temperatura de vaciado de 720 °C con una temperatura del molde de 300°C y temperatura de vaciado de 850°C y temperatura del molde de 400°C (Campbell, 1991).

Tabla 1 .Propiedades Termo-físicas de la fundición y del molde.

Material	Propiedad	Valor	Unidad
Al puro	Conductividad térmica	204.093	W/mK
	Calor especifico	895.376	J/kgK
	Densidad	2707.042	Kg/m^3
	Rango de solidificación	2.788	C
	Calor latente de fusión	3974472.406	J/kg
	Critical solid fraction (csf)	30	%
Acero	Conductividad térmica	53.618	W/mK
	Calor especifico	464.424	J/kgK
	Densidad	7842.413	Kg/m^3

Tabla 2. Parámetros de proceso utilizados en las simulaciones

PARÁMETROS	TEMPERATURA DE VACIADO (°C)	TEMPERATURA DEL MOLDE (°C)
TV720TM25	720	25
TV720TM300	720	300
TV850TM400	850	400

El programa no permite la alimentación de la velocidad de entrada del material, pero hace un cálculo de esta variable dependiendo del área transversal que se determine como material de alimentación. Para las simulaciones realizadas se tomó como entrada de material un cilindro sólido de 5 mm de radio y 3 mm de altura, ésto da una velocidad de entrada de material igual a 0,989 m/s.

3.1 Dependencia de malla

Para descartar una dependencia del resultado que se obtiene con el tamaño de malla utilizado, se realizó un barrido con tamaños de nodo desde 3 mm hasta 0,6 mm (Tabla 3) en cada uno de los ensayos.

3.2 Sensibilidad al cambio del HTC

Cuando se trabaja con moldes permanentes, el software requiere que se ingresen los HTC entre cada elemento que esté en contacto, es decir, se define el HTC entre el molde y la fundición, fundición y aire, etc.

Se trabajó con tres valores para el HTC los cuales se pueden observar en la Tabla 4. Estos valores fueron: a) tomados del manual de usuario de SolidCast®, b) calculados analíticamente por ecuaciones tradicionales de convección y radiación, y por último, c) se tomaron valores experimentales hallados en la literatura (Moraru, Luminita, 2002).

Como se puede observar las mayores diferencias se presentan en los HTC que definen la interacciones entre el molde y la fundición, es decir el IHTC, por lo cual es razonable que existan diferencias debido a las diferentes temperaturas que se emplean en cada parámetro sometido a evaluación.

Tabla 3. Parámetros de malla utilizados

Tamaño de nodo (mm)	Densidad de malla (nodos)
3	89.562
2	299.574
1.5	706.860
1	902.286
0.9	1’245.090
0.8	1’546.562
0.7	2’638.251
0.6	4’165.570

Tabla 4. HTC utilizados en las simulaciones

Zona	HTC sugeridos (W/m^2*K)	HTC calculados (W/m^2*K)	HTC Experimentales (W/m^2 K)
Molde a fundición	4800	160	1850
Molde a mazarotas	4800	160	1850
Ambiente a fundición	70	100	70
Ambiente a mazarotas	70	100	70
Ambiente a molde	40	33	40

4. RESULTADOS

4.1 Barrido de malla

En cada una de las simulaciones con el parámetro Tv720Tm25, el material baja por el bebedero hasta llegar al pocillo (Figura 1), donde se controla la turbulencia al primer segundo de vaciado y debido al gradiente térmico, la colada empieza a solidificar en el pocillo evitando el llenado completo de la cavidad (Figura 3).

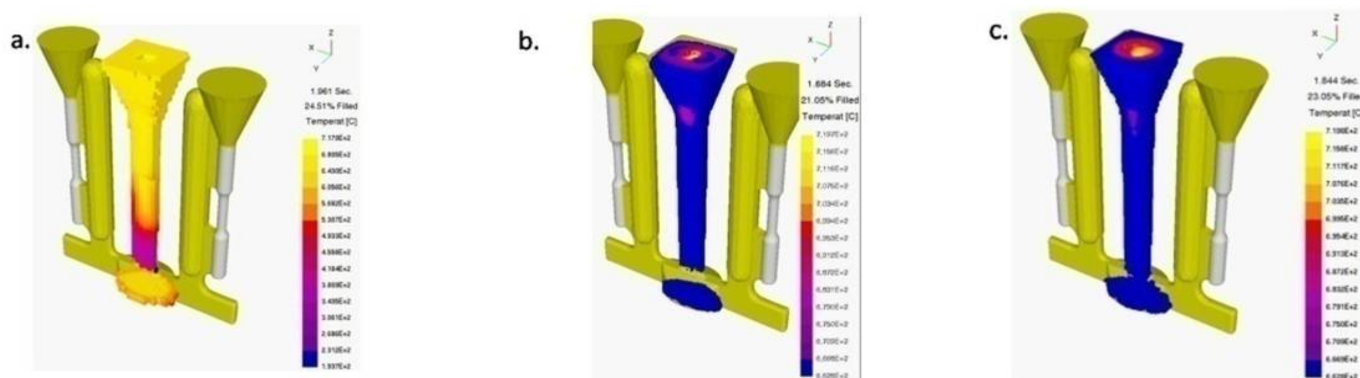


Figura 3. Simulación del llenado con los parámetros Tv720Tm25 a) Tamaño de nodo 3 mm, b) Tamaño de nodo 2 mm y c) Tamaño de nodo 1.5 mm

A medida que se disminuía el tamaño del nodo en el parámetro Tv720Tm300, la cavidad era ocupada un poco más por la aleación (Figura 4), hasta llegar a la malla con un tamaño del nodo de 0.9 mm donde el resultado se estabilizaba hasta el tamaño de nodo de 0.6 mm, el cual se observa en la Figura 4c.

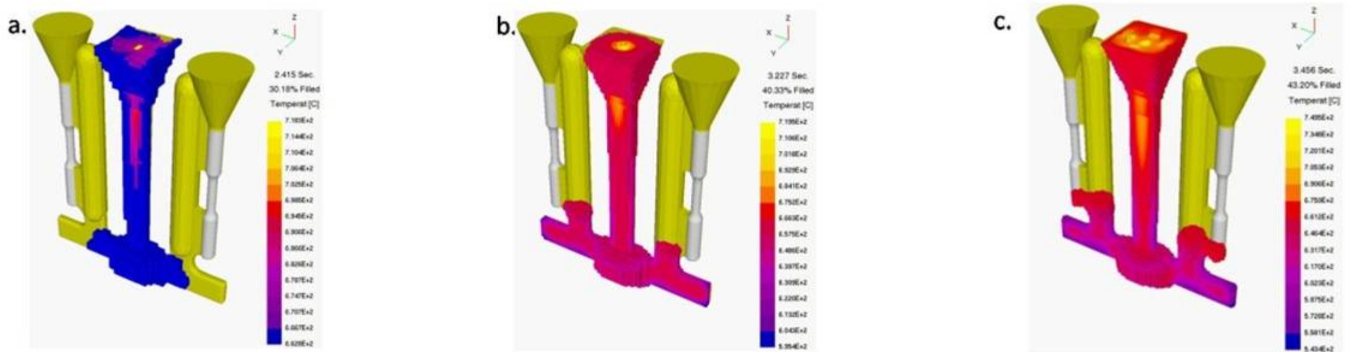


Figura 4. Simulación del llenado con parámetros TV720Tm300. a) Tamaño de nodo 3 mm, b) tamaño de nodo 1.5 mm y c) tamaño de nodo 0.6 mm

El parámetro Tv850Tm400 sigue un patrón de flujo hasta el llenado parcial del pocillo, donde el comportamiento cambia al iniciar el llenado del canal de alimentación principal. En las mallas de tamaño de nodo de 3, 1.5 y 0.8 mm se presenta un comportamiento asimétrico de llenado con respecto al bebedero, que finaliza con diferentes volúmenes de aleación dentro del molde como se puede observar en la Figura 5 a y c.

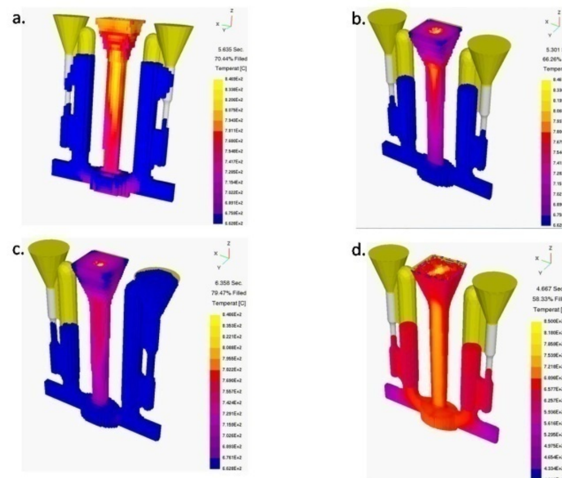


Figura 5. Simulación del llenado con parámetros de Tv850Tm400. a) Tamaño de nodo 3 mm, b) tamaño de nodo 2 mm, c) tamaño de nodo 1.5 mm y d) tamaño de nodo 0.6 mm

En las mallas con un tamaño de nodo de 2 mm, 0.8 y 0.6 mm se observa un flujo simétrico con respecto al bebedero y los patrones de flujo son similares aunque el volumen ocupado por la aleación no siempre sea el mismo como se observa en las Figuras 5 b y d.

4.2 Variación HTC

En cada uno de los parámetros se realizaron variaciones de los valores del HTC con un tamaño de nodo de 1.5 mm fijo. Los resultados finales del llenado se pueden observar en la Figura 6.

5. VALIDACIÓN EXPERIMENTAL

Para validar la simulación, el tiempo de llenado de cada uno de los parámetros fue medido mediante un cronometro y la comparación con los tiempos simulados se encuentra en la Tabla 5.

Adicionalmente se comparó la geometría una vez solidificada con aquella que muestra la simulación (Figura 7).

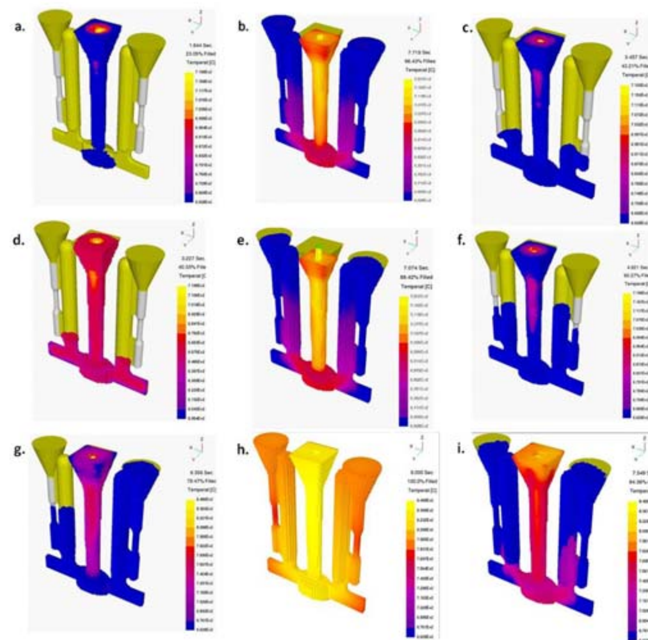


Figura 6. Volumen llenado con diferentes HTC y parámetros: Parámetro Tv720Tm25: a) HTC sugeridos b) HTC calculados c) HTC encontrados en la literatura; Parámetro Tv720Tm300: d) HTC sugeridos, e) HTC calculados, f) HTC encontrados en la literatura; Parámetro Tv850Tm400: g) HTC sugeridos, h) HTC calculados, i) HTC encontrados en la literatura.

Tabla 5. Tiempos reales y simulados del llenado del molde

Parámetro	Tiempo experimental (s)	Tiempo simulado (s)
Tv720tm25	1.96	1.84
Tv720tm300	3.02	3.260
Tv850tm400	7.9	7.549

6. DISCUSIÓN

El patrón de flujo de la aleación dentro de la cavidad del molde cambia de comportamiento de acuerdo a los parámetros de proceso utilizados, el tamaño de malla y el HTC ingresado.

Al analizar el flujo con el parámetro de proceso Tv720Tm25 se presentan pequeñas diferencias en el resultado obtenido, el cual se relaciona con la solidificación tardía de la compuerta que comunica el bebedero con el canal de alimentación en comparación con los resultados experimentales. La combinación que mejores resultados arrojo fue un tamaño de nodo de 1.5 mm con los HTC sugeridos por los desarrolladores del programa. El llenado no satisfactorio en este caso (ver Figura 7), se debe a una temprana solidificación de la aleación en el bebedero, debido al gradiente térmico que se experimenta y al aumentar la viscosidad del material se aumenta la presión en esta zona, haciendo que la colada deje de avanzar.

En cuanto al patrón de llenado con el parámetro Tv720Tm300, se puede ver una dependencia del resultado con la malla escogida hasta que se llega a un tamaño de nodo de 0.9 mm donde se estabiliza el proceso (Figura 4), aun así con la validación experimental se encontró que el tamaño de nodo más acorde era el de 1.5 mm y los HTC con los cuales se representa mejor la realidad son aquellos sugeridos por el fabricante.

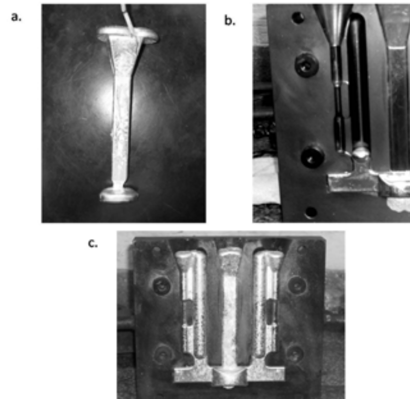


Figura 7. Resultados experimentales a) Parámetro Tv720Tm25 b) Parámetro Tv720Tm300 c) Parámetro Tv850Tm400.

Al igual que en el parámetro anterior, el bebedero solidifica antes que las demás zonas, por lo cual el molde no tiene un llenado completo.

El patrón de flujo al utilizar el parámetro Tv850Tm400 con HTC recomendados presenta diferencias a través del barrido con diferentes mallas. Por lo cual se concluye que los valores recomendados para el coeficiente de transferencia térmica son incorrectos cuando se trabaja a altas temperaturas, generando la no convergencia del resultado obtenido en las diferentes simulaciones.

Al utilizar los HTC calculados en cada uno de los casos, el molde llenó por completo, esto se da porque al tener valores tan bajos del coeficiente se cambia la naturaleza del molde, pasando de conductor a aislante térmico, por lo cual no es confiable tomar estos valores como ciertos para el parámetro Tv850Tm400 en el cual experimentalmente se obtuvo el llenado completo del molde.

Cuando se ingresan los HTC encontrados en la literatura se puede observar que para los parámetros 720V25M y 720V300M la cavidad se llena más de lo que sucede experimentalmente (Figura 6 c-f), es decir que ese coeficiente afecta el material del molde haciendo que tenga un efecto medianamente aislante a esas temperaturas. En el parámetro de proceso Tv850Tm400 se presenta el llenado completo del molde, lo cual sugiere que a temperaturas elevadas un valor de 1850 W/m^2K para el HTC es adecuado.

7. CONCLUSIONES

Se analizó el proceso de flujo de aluminio puro dentro del molde maquinado según la norma ASTM B 108/B 108M – 08 para la obtención de probetas de tensión por fundición en molde permanente, utilizando parámetros de proceso que variaban las temperaturas de vaciado y las temperaturas del molde. Con estas simulaciones se realizó un análisis de dependencia de los resultados con el tamaño de la malla utilizada al igual que se evaluó la sensibilidad del código utilizado en el software SolidCast al HTC escogido.

Se encontró que a medida que aumentan las temperaturas de trabajo, en especial la temperatura del molde, se da una dependencia con la malla que se utilice para discretizar la geometría. El tamaño del nodo sugerido es de 1.5 mm, lo cual representa un total de 3 nodos en la sección de menor espesor del cuerpo a estudiar.

En cuanto al HTC se comprobó que es un dato que afecta los resultados significativamente, pues es el que determina que tanto aislamiento o conducción presenta el molde. Este valor es complicado de calcular

analíticamente y no siempre representa valores acordes a la realidad, por lo cual es importante realizar su cálculo experimental ya que éste cambia de acuerdo a la temperatura de trabajo que se tenga.

Para el caso actual, un HTC de 4800 W/m^2K es válido para realizar la simulación cuando se tiene una temperatura de vaciado de 720°C y una temperatura del molde entre 25°C y 300°C. Este dato cambia cuando se elevan las temperaturas de trabajo a 850°C y 400°C, adoptando un valor de 1850 W/m^2K.

Es importante tener en cuenta estos aspectos que ejercen un cambio en el resultado final de las simulaciones que se corren en el programa SolidCast®, pues al no tener un criterio de evaluación de los resultados obtenidos se puede caer en el error de tomar como cierta cualquier modelación que se tenga de la realidad sin que ésta la refleje.

8. AGRADECIMIENTOS

Los autores quisieran expresar su agradecimiento a la Universidad Eafit y al Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación, Colciencias por su apoyo económico mediante el contrato No 525-09.

BIBLIOGRAFÍA

Campbell, J.(1991). *Castings*. Butterwoth Heinmann.

Flemings, M C. (1974). *Solidification Processing*. McGraw-Hill Book Co, New York.

Moraru, Luminita (2002). "The heat transfer coefficient during the solidification of aluminum" *Czechoslovak Journal of Physics*, Vol. 52, pp. 387-393.

Ik-Tae, Im., Woo-Seung, Kim. and Kwan-Soo, Lee. (2001). " A unified analysis of filling and solidification in casting with natural convection". *International journal of Heat and Mass Transfer* Vol 44, pp. 1507-1515.

Kermanpur, A., Mahmoudi, Sh. and A, Hajipour. (2008). " Numerical simulation of metal flow and solidification in the multi-cavity casting moulds of automotive components". *Journal of materials Processing technology* ,Vol 206, pp. 62-68.

Sirviö, M., Wo, M. (2009). "Casting directly from a computer model by using advanced simulation software FLOW-3D Cast". *Archives of foundry engineering*, Volume 9, Issue 1, pp 79-82.

Jolly Mark. (2002). " Castin simulation: How well do reality and virtual casting march? State of the art review". *Cast Metals Res*, Vol 14, pp 303-313.

Titus Chellaih, Girish Kumar, K. Narayan Prabhu. (2007). " Effect of thermal contact heat transfer on solidification of Pb–Sn and Pb-free solders". *Materials and Design*, Vol 28, pp 1006–1011

Haipeng Jin., Jiarong Li., Jing Yu., Shizhong Liu. (2010) " Study of Heat Transfer Coefficient Used in the Unidirectional Solidification Simulation Based on Orthogonal Design". *Rare Metal Materials and Engineering,* Volume 39, Issue 5, pp 767-770

Shang, Z and Lo, S. (2010) "CFD in supercritical water-cooled nuclear reactor (SCWR) with horizontal tube bundles" *Nucl. Eng. Des*., doi:10.1016/j.nucengdes.2010.09.024

S. Tóth and A. Aszódi. (2010). "CFD analysis of flow field in a triangular rod bundle". *Nuclear Engineering and Design*, vol 240 pp 352–363

U.S. Department of Energy.(1992) *Doe fundamentals handbook thermodynamics, heat transfer,and fluid flow Volume 2 of 3*.

Kumruoglu, L.C. and Özer, A.(2008) "Investigation of critical liquid fraction factor in nodular iron castings by computer simulation". *Journal of materials processing technology* Vol 197, pp 182–188

AUTORIZACIÓN Y RENUNCIA